# تاثیر تعداد و عرض بافل ها بر زمان اختلاط در میکسر دینامیکی استخراج حلالی مس: شبیه سازی CFD و تصویربرداری مستقیم*

سروش پرویزی[۱] اسکندر کشاورز علمداری[۲] سید سروش الدین رضوی[۳]


## چکیده

*میکسر مشابه میکسر استخراج حلالی مس طراحی و مش بندی شد و جهت صحت سنجی، نمونه آزمایشگاهی آن ساخته شد. از مدل k-ε و روش مش متحرک برای شبیه سازی استفاده شد. خواص مایعات آلی و آبی، از آنالیز محلول های مجتمع مس سرچشمه بدست آمد. زمان اختلاط از توزیع اندازه قطرات توسط مدل بالانس جمعیت محاسبه شد. برای صحت سنجی از نتایج تجربی و تصویربرداری مستقیم استفاده شد. با افزایش تعداد و عرض بافل ها، فرایند اختلاط بهبود یافت و زمان اختلاط به شدت کاهش پیدا کرد. معادله ریاضی برای محاسبه زمان اختلاط تحت تاثیر تعداد و عرض بافل ها با استفاده از بسط نتایج آزمایش ها بدست آمد.*


**واژه‌های کلیدی** میکسر دینامیکی، استخراج حلالی مس، زمان اختلاط، عرض و تعداد بافل، معادله بالانس جمعیت، دینامیک سیالات محاسباتی

# The Effect of Number and Width of Baffles on Mixing Time in Copper Solvent Extraction Dynamic Mixers: CFD Simulation and Direct Photography

S. Parvizi E. Keshavarz Alamdari S. S. Razavi


## Abstract

*The dynamic mixer has been designed and meshed according to copper solvent extraction mixer. Validation of data has been done by the experimental setup. k-ε turbulent model and sliding mesh have been used for fluid flow simulation. Organic and aqueous liquids have been provided from the solvent extraction unit of Sarcheshmeh copper complex, Iran. The mixing time has been calculated using population balance model outputs analysis. According to the results, by increasing the number and width of baffles, mixing process is improved and mixing time is decreased. Increasing turbulent flow intensity made to improve the efficiency in this situation. An equation has been developed for calculating mixing time. The variables of the equation are baffles number and width.*


**Keywords** Dynamic Mixer, Copper Solvent Extraction, Mixing Time, Width and Number of Baffle, Population Balance Model, Computational Fluid Dynamics

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۶/۱/۱۳ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۶/۷/۳۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مواد و فناوری های نوین.
**Email:** parvizi@sru.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی.

(۳) دانشجوی دکتری مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی.

**DOI: 10.22067/ma.v30i2.63478**

## مقدمه

زمان اختلاط به عنوان زمان مورد نیاز برای رسیدن به یک درجه خاصی از همگنی از اهمیت خاصی برخوردار است. زمان اختلاط به عنوان یک پارامتر کلیدی برای ارزیابی عملکرد سیستم استفاده می شود. از نقطه نظر تجربی، چندین تکنیک برای اندازه گیری زمان اختلاط توسعه یافته است. بسته به نوع اطلاعات تولید شده، می توان زمان اختلاط را به اندازه گیری در سیستم اویلری و لاگرانژی تقسیم بندی کرد. انتخاب روش وابسته به عوامل مختلف از جمله دقت، تکرار پذیری، هزینه، سرعت نمونه برداری، نوع داده ها و زمان پردازش متفاوت است [1].

براساس پژوهش آسکانیو [1]، روش‌هایی مانند کالریمتری و PLIF (Planar laser-induced fluorescence) با پردازش تصویر دیجیتال در سال های اخیر با روش‌های اندازه گیری قوی تر و دقیق تکمیل شده است. از سوی دیگر، روش های نسبتا جدید بر اساس ردیابی رادیواکتیو مانند ردیابی ذرات ایجاد شده است.

مونتانته و پاگلیانتی [2] اقدام به بررسی اثر نوع پروانه بر زمان اختلاط و اعداد بدون بعد در میکسر گاز مایع کردند. هدف اصلی آنها تجزیه و تحلیل نرخ جریان گاز و سرعت چرخش پروانه در رژیم های مختلف دمش گاز بود. آنها داده های آزمایشگاهی را با استفاده از روش های آنالیز نوری بدست آوردند. این داده ها می توانند برای ارائه مدلهای شبیه سازی CFD مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از آنالیز ERT (Electrical Resistance Tomography) توزیع گاز و زمان اختلاط و خصوصیات محلی سیستم بر اساس شرایط هندسی سیستم بررسی شده است. یک رویکرد ساده شده برای ارزیابی زمان اختلاط به صورت یک تابع اصلاح شده، برای پروانه های مختلف ارائه شد.

لو و همکاران [3]، اقدام به بررسی اثرات عرض و تعداد تیغه ی پروانه راشتون برای سیستم های با و بدون هوا دهی کردند. بکارگیری تعداد مناسب تیغه به وضوح میزان اختلاط را بهبود می بخشد. با این حال، آشفتگی بیش از حد به وسیله پروانه، سبب افزایش طول زمان اختلاط می شود. از روش های عددی برای بررسی اثر بافل ها بر زمان اختلاط استفاده شد. با تعمیم نتایج به دست آمده، روش های عددی برای شبیه سازی یک سیستم با پروانه سه گانه استفاده شد. روند زمان اختلاط بسیار شبیه به سیستم تک پروانه است. در نهایت رابطه (۱) برای پیش بینی زمان اختلاط در میکسر، با یک پروانه راشتون ارائه شد.

$$Nt_M = 55.7(n_b)^{-0.30}(B/T)^{-0.1535}(Q_g/ND^3)^{0.0296} \quad (۱)$$

در صورتی که از سه پروانه استفاده شود رابطه (۲) استفاده می شود.

$$Nt_M = 46.5(n_b)^{-0.295}(B/T)^{-0.327}(Q_g/ND^3)^{0.010} \quad (۲)$$

امر و همکاران [4] اقدام به بررسی اثر طول بافل در جریان آشفته در مخازن اختلاط کردند. رفتار هیدرودینامیکی یک توربین راشتون (RT6) را به صورت عددی با حل معادلات ناویر استوکس و مدل اغتشاشی k-ε پیش بینی شد. این معادلات با استفاده از روش حجم محدود گسسته حل شد. براساس نتایج عددی بدست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی، مقدار مصرف برق محاسبه شد. میزان مصرف انرژی به شدت تابع عرض بافل است. بنابراین، حضور بافل ها در مخزن تا حد زیادی سبب بهبود کیفیت مخلوط می شود. بنابراین مخزنی با عرض بافل بهینه شده بر مبنای مصرف انرژی طراحی شد.

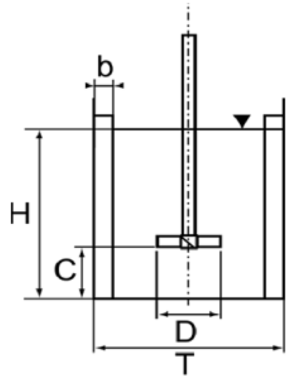
ماسیوک و همکاران [5] اقدام به اندازه گیری مصرف برق و زمان اختلاط در میکسر ها نمودند. روابط تجربی برای پیش بینی مصرف برق، زمان اختلاط و انرژی مورد نیاز برای رسیدن به درجه همگنی مورد نظر، ارائه شد. سرعت چرخش پروانه تاثیر محسوسی بر زمان اختلاط و انرژی لازم برای اختلاط می گذارد. همچنین این دو پارامتر را می توان بر اساس عدد رینولدز محاسبه کرد. معادله (۳) برای محاسبه انرژی لازم برای اختلاط ارائه شد.

$$Pt = 14\,Re^{0.5}\left(\frac{w}{d}\right)^{-0.15}\left(\frac{s}{d}\right)^{0.3} \quad (۳)$$

## ساخت تجهیزات و طراحی آزمایش

با توجه به مطالعات انجام شده توسط بروها و همکاران [6]، مخزن میکسر با توجه به شکل (۱) در نرم افزار گمبیت

شبیه سازی و مش بندی شد. در این پژوهش برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل k-ε و برای حرکت پروانه درون مخزن میکسر از روش مش بندی، مش متحرک استفاده شد. همچنین در بخش حل معادلات بالانس جمعیت، از روش DM برای بررسی و دستیابی به توزیع اندازه قطرات درون میکسر استفاده شد.




شکل ۱ هندسه میکسر (با نسبت H=T=10b=3D=3C )

در پژوهشی که توسط لو و همکارانش در سیستم مایع با پروانه راشتون صورت گرفته بود، تعداد بافل های بیشتر از ۸ و نسبت عرض بافل به قطر تانک (b/T) بیشتر از ۰/۲ به عنوان بافل گذاری اضافی (Excessive baffling) در نظر گرفته شده بود [3]. در پژوهش فعلی برای بررسی عرض بافل، مخزن میکسر دارای ٤ بافل با عرض های ۲۱، ۲٦ و ۳۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. و برای بررسی تعداد بافل، تعداد ۳، ٤ و ٦ بافل برای میکسر در نظر گرفته شد. سرعت پروانه ۲۰۰ دور بر دقیقه و پروانه با فاصله ۷ سانتیمتر از کف مخزن در نظر گرفته شد. همچنین نوع پروانه RT با قطر ۷ سانتیمتر انتخاب شد.

برای صحت سنجی شبیه سازی های انجام گرفته در این پژوهش، ابتدا سعی شد با استفاده از پژوهش های سایر محققان میکسر در ابعاد آزمایشگاهی طراحی و ساخته شود. برای ساخت میکسر به دلیل نوع آنالیز انتخاب شده (تصویر برداری در محل) از شیشه پیرکس جهت ساخت مخزن و از پلیمر مقاوم در برابر اسید برای ساخت بافل ها استفاده شده است. مواد آلی و آبی مورد استفاده به صورت مستقیم از واحد استخراج حلالی مجتمع مس سرچشمه تهیه شد. همچنین جهت بررسی زمان اختلاط از یک دوربین مخصوص با قابلیت فیلمبرداری ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه و سیستم نورپردازی مناسب با قابلیت تابش نورهای پلاریزه و با طول موج مشخص ٦٤٠ نانومتر استفاده شد.

## نتایج و بحث

با توجه به روش های مختلف اشاره شده برای محاسبه زمان اختلاط، در این پژوهش نتایج از طریق شبیه سازی بدست آمده است و توسط فیلمبرداری مستقیم صحت سنجی شده است.

### محاسبهٔ زمان اختلاط در روش شبیه سازی

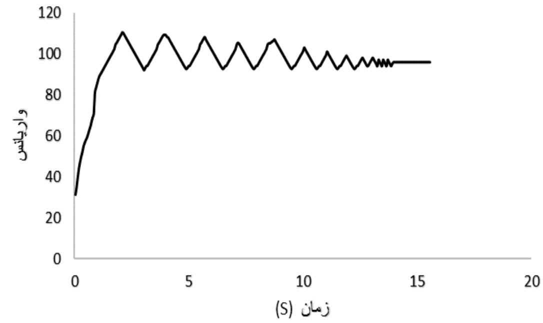
برای محاسبه زمان اختلاط از تابع واریانس در زمانهای مختلف استفاده می شود، گام زمانی ۰٫۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده است، ابتدا میانگین داده ها برای هر زمان، بر اساس رابطه‌ی (٤) محاسبه می شود.

$$\bar{D}=\frac{\sum_{i=1}^{n}D_i * N(\nu)_i}{\sum_{i=1}^{n}N(\nu)_i} \quad (٤)$$

در این معادله n تعداد بازه های مورد بررسی و $N(v)_i$ تعداد قطرات در بازه i ام و $\bar{D}$ میانگین اندازه قطرات است. واریانس توزیع اندازه قطرات از میانگین اندازه‌ی قطرات، بر اساس رابطه‌ی (۵) محاسبه می شود.

$$Var^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(D_i-\bar{D})^2 \quad (۵)$$

در این معادله $D_i$ میانگین اندازه قطره در بازه i ام است. پس از رسیدن به زمان اختلاط، نرخ شکست برابر با نرخ به هم پیوستن است و توزیع اندازه قطرات ثابت خواهد بود. بنابراین تغییرات واریانس به صفر خواهد رسید. با محاسبه واریانس، زمان اختلاط محاسبه می شود (شکل ۲).




شکل ۲ واریانس اندازه قطرات

### محاسبه‌ی زمان اختلاط در روش آزمایشگاهی

برای بررسی زمان اختلاط در روش آزمایشگاهی و صحت سنجی شبیه سازی های انجام گرفته، ابتدا تعداد ۱۰ ویدئو با تعداد ٤٨٠ فریم بر ثانیه برای هر یک از سیستم هـای مـورد نظر تهیه شد. سپس با استفاده از فیلمهای بدسـت آمـده، از زمان شروع به حرکت پروانه تـا زمـان پایـداری جریانهـای هیدرودینامیکی، به عنوان زمان اختلاط در نظر گرفتـه شـد، بر این اساس و با توجه به رابطه (٦) زمان اختلاط محاسـبه شد.

$$M_t = \frac{t_{exp}}{16} \qquad (٦)$$

در این رابطه $t_{exp}$ میانگین زمان اختلاط محاسبه شده است.

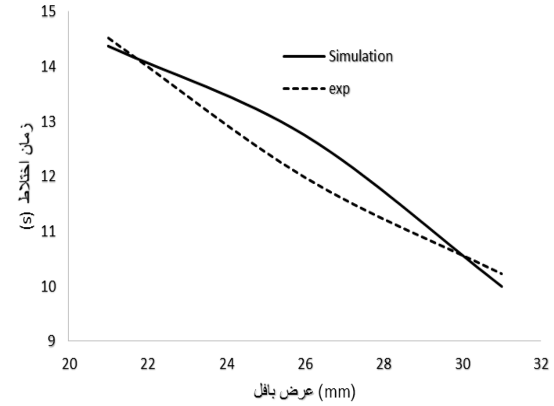
### تاثیر افزایش عرض بافل بر زمان اختلاط

بر اساس شکل (۳) با افزایش عرض بافل ها زمان اخـتلاط کاهش می یابد. به نظر می رسد افزایش سـرعت جریانهـای اختلاطی و ابعاد ایـن جریانهـا از عوامـل مـوثر هسـتند. در پژوهش لو و همکاران نیز عرض بافل مطـابق رابطـه‌ی (۷) تاثیر معکوس بر زمان اختلاط دارد و تاثیر آن در مقایسه بـا تعداد بافل ها کمتر است [3].

$$M_t \alpha (b/T)^{-0.1535} \qquad (۷)$$

در این رابطه $N_{tM}$ زمان اخـتلاط، b عـرض بافـل و T قطر مخزن است. تفاوت اساسـی پـژوهش انجـام شـده بـا تحقیقات لو و همکاران نوع سیستم مورد بررسی اسـت، بـه نحوی که در این پژوهش سعی شده است علاوه بر مباحث شبیه سازی و مدل سازی اختلاط، تاثیر پارامترهای مهمی از جملـه pH و غلظـت عناصــر آلیــاژی کــه در واحــدهای استخراجی از اهمیت فراوانی برخوردار است، در نظر گرفته شود، این پارامترها با اعمال خواص محلولهای آلـی و آبـی بدست آمده از واحد های استخراجی مس در مجتمـع مـس سرچشمه در نظر گرفته شد. درپژوهش اخیـر تـاثیر عـرض بافل بر زمان اختلاط از روش ذکر شـده در بخـش قبلـی از رابطه‌ی (۸) محاسبه شده است.

$$M_t = 1.81(\frac{b}{T})^{-0.9} \qquad (۸)$$




شکل ۳ تاثیر عرض بافل ها بر زمان اختلاط (مقایسه نتایج شبیه سازی و روش آزمایشگاهی)

### تاثیر پارامتر تعداد بافل بر زمان اختلاط

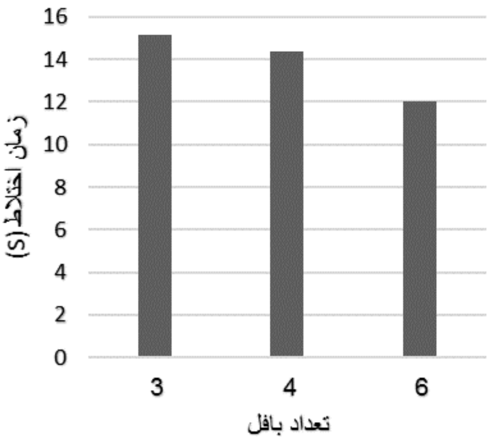
همانطور که در شکل (٤) مشاهده می شـود افـزایش تعـداد بافل ها منجر به زمان اختلاط کمتر خواهد شد.

لو و همکاران [3] در پژوهشی مشابه بین تعداد بافل و زمان اختلاط معادلۀ (۹) را بدست آوردند، کـه نشـانگر رابطـه ی معکوس بین زمان اختلاط و تعداد بافل است.

$$M_t \alpha 55.7(n_b)^{-0.30} \qquad (۹)$$

در این رابطه $N_{tM}$ زمان اختلاط و $n_b$ تعداد بافل اسـت. در سیستم مورد بررسی در ایـن پـژوهش زمـان اخـتلاط از رابطه‌ی (۱۰) بدست می آید.

$$M_t = 19.4\exp(-0.08n_b) \quad (۱۰)$$




شکل ٤ تاثیر تعداد بافل بر زمان اختلاط

## نتیجه گیری

۱. با افزایش تعداد بافل ها در محدوده مورد بررسی، جریان های اغتشاشی افزایش می یابد که سبب کاهش زمان اختلاط در مخزن میکسر می شوند.

۲. افزایش ابعاد بافل ها در محدوده مورد بررسی، سبب افزایش اندازه و قدرت جریانهای اغتشاشی شده که این پارامتر نیز مانند تعداد جریانهای اغتشاشی سبب کاهش زمان اختلاط در محدوده مورد بررسی می شود.

۳. دلیل عدم انطباق نتایج تجربی و شبیه سازی عدم پوشش دهی کل مخزن میکسر توسط دوربین و احتمال خطای انسانی در اندازه گیری ها می باشد. حین فرایند فیلم برداری تنها از بخشی از مخزن (حدود ۱۵ درصد) قابلیت ثبت با دوربین را دارد.

٤. افزایش تعداد و عرض بافل ها در محدوده مورد بررسی سبب کاهش زمان اختلاط بر اساس معادله (۱۱) می شود.

$$M_t = 2.4922 * \left(\frac{b}{T}\right)^{-0.9} * \exp(-0.08n_b) \quad (۱۱)$$

## مراجع

1. Ascanio G., "Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 1065-1076, (2015).
2. Montante G., Paglianti A., "Gas hold-up distribution and mixing time in gas–liquid stirred tanks", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 279, pp. 648-658, (2015).
3 Lu W.-M., Wu H.-Z., Ju M.-Y., "Effects of baffle design on the liquid mixing in an aerated stirred tank with standard Rushton turbine impellers", *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, pp. 3843-3851, (1997).
4. Ammar M., Driss Z., Chtourou W., Abid M., "Effects of baffle length on turbulent flows generated in stirred vessels", *Open Engineering*, Vol. 1, pp. 401-412, (2011).
5. Masiuk S., Łacki H., Strek F., "Power consumption and mixing times for liquid mixing in a ribbon mixer", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 48, pp. 135-140, (1992).
6. Brůha O., Brůha T., Fořt I., Jahoda M., "Dynamics of the flow pattern in a baffled mixing vessel with an axial impeller", *Acta Polytechnica*, Vol. 47, (2007).